



TITLE:

微小接合系におけるスピン依存伝導のダイナミクス(Digest_要約)

AUTHOR(S):

荒川, 智紀

CITATION:

荒川, 智紀. 微小接合系におけるスピン依存伝導のダイナミクス. 京都大学, 2014, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2014-09-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r12854>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開

学位論文の要約

題目 微小接合系におけるスピン依存伝導のダイナミクス

氏名 荒川 智紀

序論

エレクトロニクスは半導体デバイスを中心に急速な発展を遂げ、現在の情報化社会において根幹的な役割を果たすようになっている。現在のエレクトロニクス素子の動作原理は多岐にわたっているが、一貫して言えることは電流を様々な方法で制御しているということであり、固体素子中における電気伝導の研究の重要性は言うまでもない。ここで注意して考えてみると、世の中で活躍しているデバイスは電子の電荷のみを利用している。ところが、電気伝導を担う電子には電荷だけでなくスピンの自由度もあり、このスピンの自由度を、電荷の自由度とは独立して制御することが可能となれば、新たな機能を持ったデバイスの創出が期待されるばかりでなく物性物理学の更なる発展に繋がると期待される。

ここで、スピンは電荷と異なり、伝導体を伝搬する過程で緩和してしまうという弱点がある。しかし、電子の平均自由行程ほどの系を準備することができれば、スピンの自由度をより顕著に利用することが可能になると予想される。このような背景において、近年では微小接合系におけるスピン依存伝導現象が注目されている。

本研究は微小接合系におけるスピン依存伝導現象のダイナミクスの解明を目的としたものであり、その主な手法として雑音測定を用いた。一般的な手法である電気伝導度測定は素子に電圧を印加した際に誘起される電流を測定するもので、これは時間平均された系の応答を観測するものである。これに対し、雑音測定とは素子で生じる“ゆらぎ”を検出するものである。本研究では特に雑音の中でも、電子の分配過程に伴うショット雑音に焦点をあて、独自に立ち上げた低温環境下の測定系において高感度な測定を行った。

少数チャネル系における精密電流ゆらぎ測定

半導体やグラフェンなどの 2 次元電子系を微細加工した系では、伝導を担う量子化した伝導チャネルを 1 本単位で制御することが可能である。このような少数チャネル系は電子を一個単位で制御可能な単電子トランジスタ、量子力学的な重ね合わせを用いた量子コンピュータなどの次世代の技術を生み出す舞台として注目されている。また、スピン依存伝導過程の観点からも注目されており、スピン軌道相互作用や近藤効果などを研究する理想

的な舞台である。ショット雑音測定はこのような少数チャネル系の伝導ダイナミクスを解明する上で優れたプローブである。ただし、ショット雑音測定の技術的なハードルは高く、世界的にみても限られたグループからしか実験報告はない。特に、電子温度 100 mK 以下という極低温下におけるショット雑音の報告例は極めて少なかった。

少数チャネル系においてショット雑音測定を精密に測定する方法として、LC 共振回路と高移動度トランジスタ(HEMT) からなる低温増幅器を利用したものが一般的である。本研究では極低温下における雑音測定の高感度測定を目標として HEMT を用いた低温増幅器の開発を行い、増幅器の $1/f$ 雑音を劇的に減少させることに成功した。さらに、この増幅器を用いて量子ポイントコンタクトのショット雑音を測定することで測定系の評価を行い、電子温度 23 ± 8 mK においても高感度(10^{-29} A²/Hz)な電流雑音の測定に成功した。

MgO 系 TMR 素子における非平衡電流ゆらぎ

トンネル磁気抵抗(TMR) 効果とは強磁性体/絶縁体/強磁性体接合における磁気抵抗効果であり、2 つの強磁性体の磁化が平行(P) 状態の場合にはトンネル抵抗が小さく、反平行(AP) 状態の場合にはトンネル抵抗が大きい。この効果は当初、3d 磁性金属とアモルファスの酸化アルミニウム Al₂O₃ を用いた系で盛んに研究が行われた。その後、単結晶 MgO をトンネル障壁に用いた TMR 素子において巨大な磁気抵抗効果が発見され、TMR 素子の性能は飛躍的に向上した。MgO 系 TMR 素子において巨大な磁気抵抗効果の鍵となっているのがコヒーレントトンネリングと呼ばれる効果であり、この効果の定量的かつ基礎的な理解は応用上だけでなく、基礎物理的にも重要なテーマである。

本研究では CoFeB/MgO/CoFeB 接合からなる TMR 素子を用い、伝導過程のコヒーレント性に敏感なショット雑音を P 状態と AP 状態の双方において精密に測定することで、磁化配向に依存した伝導過程の違いを定量的に評価した。さらに、得られた全ての結果は第一原理計算にもとづく理論と定量的に一致し、この一致をもってコヒーレントトンネリングの存在を直接的に証明した。

TMR 素子における磁化ゆらぎ

TMR 素子は磁気センサー、磁気メモリー、乱数発生器、マイクロ波発信器、マイクロ波検波器などへの幅広い応用が期待されている。これらの応用において、重要なパラメータとして信号雑音(S/N) 比が挙げられる。TMR 素子では、この S/N 比は $1/f$ 雑音、ランダムテレグラフ雑音(RTN)といった低周波の抵抗ゆらぎ雑音によって制限されている。これらの抵抗ゆらぎ雑音が磁化のゆらぎに起因することは知られているが、そのゆらぎのメカニズムの理解は不十分であった。

本研究では $1/f$ 雑音と RTN の外部磁場とバイアス電圧依存性を系統的に調査することでこれらの雑音の起源を明らかにした。 $1/f$ 雑音は磁化の熱ゆらぎによって発生し、このゆらぎは磁化における揺動散逸定理を満たしていることを確認した。一方、RTN は一様磁化の微小な角度の変化や微小な構造変化がその起源であることを明らかにした。また、RTN の場合には $1/f$ 雑音の場合と異なり、磁化配向とバイアス電圧に依存した励起過程存在することを見いだした。

スピンショット雑音の観測

通常のショット雑音は電子の分配過程に起因し、電荷の離散性の直接的な帰結である。これに対し、電子は離散的なスピンも持っており、このスピンも電流のゆらぎに何らかの影響を与えるであろう。実際に、理論的にはこのようなスピンに依存したショット雑音の予測がなされていたが、これまでにスピンの離散性に起因するショット雑音の実験的な報告はなかった。

本研究ではこのようなスピンに起因するショット雑音、特に、スピンに依存したケミカルポテンシャルによって生成されたショット雑音(スピンショット雑音) に注目し、世界で初めて観測に成功した。スピンショット雑音を生成するにあたり、本研究では非局所スピバルブ素子を用いた。さらに特殊な測定系を構築することでトンネル障壁を流れる電流とスピン流を独立に制御することで、通常の電荷ショット雑音とスピンショット雑音の寄与を分離し、それぞれの振る舞いを独立に評価した。その結果、トンネル過程において電荷とスピンが一体となって通過していることを実証する結果を得た。

総括

本研究では近年急速に広がりを見せる微小接合系のスピン依存伝導過程に注目し、雑音測定を用いてその伝導ダイナミクスを解明した。雑音測定は素子で生じる”ゆらぎ”を検出する測定手法であるが、そこから通常の伝導度測定では知ることのできない本質的な情報を得ることができる。しかし、一般的にゆらぎの信号は小さく、その測定には技術的な困難が伴う。本研究では独自に立ち上げた雑音測定系を駆使して世界最高レベルの感度で雑音測定を行い、以上で述べたようにスピンに依存した電子のコヒーレンスの評価、局在磁化のスピンゆらぎの解明、スピン流に起因するゆらぎの検出といったユニークな結果を得た。これらの結果はスピン依存伝導過程を解明する上で”ゆらぎ”が重要であることを実証したものであり、今後の研究を大いに刺激するものであると確信している。